

УДК 621.313.322

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ЕЕ КРЕПЛЕНИЯ В ТОРЦЕВОЙ ЗОНЕ СЕРДЕЧНИКА

К.А. Кучинский, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина
e-mail: kuchynskyy@mail.ru

Численно исследованы термомеханические характеристики изоляции стержня обмотки статора мощного турбогенератора с учетом различных конструктивных факторов. Определены закономерности распределения термонапряжений, установлено незначительное снижение их значений в пазовой части и эффект «миграции» максимальных величин в пространстве при наличии свободного участка обмотки в торцевой зоне сердечника. Полученные результаты объясняют факты локального ослабления прессовки и распушения пакетов статора, расположенных непосредственно после свободных участков или после склеенных пакетов на некотором расстоянии от торца, что усугубляет процесс деградации сердечника статора генератора в рабочих режимах. Библиограф. 8, рис. 3.

Ключевые слова: турбогенератор, обмотка статора, изоляция, термомеханические перемещения и напряжения, метод конечных элементов.

Наиболее серьезными причинами аварий турбогенераторов (ТГ) являются повреждение сердечников и обмоток статора (ОС) и ротора, которые приводят к значительным материальным и временным потерям.

В большой мере надежность работы машины определяют физические процессы, происходящие в торцевой зоне статора. Их изучению посвящены работы в различных направлениях: в частности, оценивались воздействующие на крайние пакеты сердечника электромагнитные усилия, которые приводят к напряженному состоянию листов железа и нажимных пальцев; моделировались вихревые токи и потери в концевых зонах; исследовалось влияние тепловых воздействий на состояние шихтованного пакета магнитопровода и его стяжных элементов; изучался механизм падения прессовки в зубцах крайних пакетов и распушения последних и т.д.

Степень эффективности конструктивных мероприятий по обеспечению более благоприятного распределения максимальных величин местных потерь и уменьшению локальных перегревов, термомеханических напряжений может оцениваться только по результатам детальных исследований распределения температурных и термомеханических полей элементов ТГ расчетно-теоретическими методами или проведения экспериментов на натурных объектах либо макетных образцах. Известны результаты исследований термомеханических характеристик отдельных узлов ТГ, базирующихся на расчетах одномерных схем.

При допущении о равномерности распределения по длине механических параметров и нагревов по упрощенной четырехстержневой расчетной модели статора приближенно оценивались аксиальное усилие в узлах крепления лобовых частей обмотки, максимальное напряжение в меди и среднее давление в сердечнике без учета крепления обмотки в пазу и отдельных связей между элементами [8].

Конструктивные мероприятия, направленные на уменьшение термомеханических воздействий на сердечник статора ТГ, анализировались в [1] для оценки эффективности снижения фрикционного взаимодействия пазовой части обмотки статора и зубца в торцевой зоне. Для этого в расчетной модели предполагалась возможность освобождения обмотки в торцевой зоне сердечника на некоторую глубину L_c (до 0,5 м при расчетах). Поскольку параметры закрепления ОС зависят от конструкции, особенностей выполнения системы крепления, эксплуатационного состояния машины и могут меняться в широком диапазоне значений, их определение основано на сопоставлении результатов расчетных и экспериментальных исследований термомеханического состояния статоров ТГ. В теоретических выводах утверждается, что

снижение фрикционного взаимодействия пазовой части обмотки и зубца сердечника в торцевых зонах статора позволяет ограничить неравномерность распределения давления прессования вдоль статора и снизить на 20 % его термомеханическую составляющую в крайних пакетах.

Аналогично в [5] на основе шестистержневой одномерной модели анализируется влияние снижения уровня фрикционного взаимодействия между обмоткой и зубцами в торцевой зоне на определенной длине L_c на характер распределения давления прессования сердечника. При этом допускается, что все стержни модели нагреты равномерно по длине и расточке статора.

В то же время анализ термомеханических деформаций и напряжений стержней и зубцов в работе [3] показал, что значительное проскальзывание стержней относительно зубцов (при высоком нагреве обмотки по сравнению с сердечником) может приводить к снижению давления прессовки в торце зубца и к появлению его остаточной термомеханической составляющей. С целью снижения термомеханического воздействия стержней обмотки на зубцы торцевой зоны рекомендуется проводить модернизацию крепления обмотки в пазах статора путем внедрения упругоэластичных пазовых клиньев и упругоэластичных боковых прокладок.

Анализ результатов термомеханических исследований в мощных ТГ позволяет сделать вывод, что для теоретического обоснования одномерных стержневых расчетных схем решающее значение имеет выбор их параметров, в частности, силы фрикционного закрепления обмотки в пазу статора, аксиальной составляющей жесткости крепления лобовых частей обмотки к нажимной плите и т.д. [4]. Ряд сочетаний этих параметров зачастую получается выделить только на основе результатов экспериментальных исследований, которые в свою очередь чрезвычайно сложно проводить на натуральных объектах в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, особенности термомеханических процессов в изоляции и меди стержней ОС изучены недостаточно: в научной литературе приводится ограниченный объем экспериментальных данных; при проведении расчетов принимаются существенные дополнительные упрощения по ограничению размерности исследуемой области либо из рассмотрения исключается влияние отдельных факторов, что сужает рамки применения получаемых результатов; известны также определенные противоречия в исходных методологических предпосылках и попытках согласования результатов при теоретических исследованиях термомеханических процессов в элементах статора мощных ТГ [1, 3, 4, 5, 8 и др.].

Получение уточненных данных по величинам температурных перемещений, деформаций и напряжений в стержнях ОС генератора может быть достигнуто на основе полевого расчета при помощи метода конечных элементов (МКЭ) [6]. Преимущества МКЭ по сравнению с традиционными конечно-разностными методами заключаются в легкости расчета напряженного состояния тел из нескольких материалов, возможности варьирования густотой сетки в областях предполагаемой концентрации или ослабления напряжений, простоте учета различных граничных условий. МКЭ приводит к разреженным или ленточным структурам матриц в уравнениях равновесия, удобным для решения прямыми или итерационными методами.

В данной работе отражены результаты численных расчетных исследований влияния свободного участка стержня в торце паза на величины перемещений и зону концентрации максимальных термомеханических напряжений в изоляции обмотки статора для ТГ типа ТГВ-200 мощностью 200 МВт при работе его в номинальном режиме. Исходными данными для расчета термомеханических характеристик являлись распределения нагревов основных узлов статора в аксиальном направлении по результатам тепловых испытаний на Бурштынской ГРЭС [7].

Конструкция крепления ОС должна исключать радиальные и тангенциальные перемещения в ее лобовых частях, но не препятствовать при этом перемещениям в аксиальном направлении при тепловом удлинении прямолинейной пазовой части обмотки [2]. Тем самым оговариваются граничные условия при решении задачи для расчетной области (рис. 1 – модель наиболее нагретой половины стержня (пазовая и лобовая части) ОС генератора со стороны турбины). В механическом отношении более уязвимыми являются участки стержней на выходе из паза, поэтому практический интерес представляет оценка величин термомеханических перемещений и напряжений ОС на выходе из крайнего пакета.

Для определения неизвестных перемещений U в узлах i, j, m элемента (соответственно переменные с индексами «2-1» – по оси x , с индексами «2» – по оси y декартовой системы

координат) с учетом соответствующих начальных и граничных условий составляется уравнение

$$[k] \cdot [U_{2i-1} \ U_{2i} \ U_{2j-1} \ U_{2j} \ U_{2m-1} \ U_{2m}]^T = \{f\}, \quad (1)$$

где $[k]$ – матрица жесткости, устанавливающая связь между векторами узловых усилий и узловых перемещений; $\{f\}$ – вектор нагрузки элемента:

$$[k] = [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot t \cdot S, \quad (2)$$

где $[B]$ – матрица градиентов, связывающая деформации и перемещения; $[D]$ – матрица упругих констант; t – толщина элемента; S – его площадь;

$$[D] = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона материала элемента.

Вектор нагрузки элемента:

$$\{f\} = [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \cdot t \cdot S = \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot \Delta T}{2 \cdot (1-\mu)} \cdot [b_i \ c_i \ b_j \ c_j \ b_m \ c_m]^T, \quad (4)$$

где $b_i, b_j, b_m, c_i, c_j, c_m$ – коэффициенты матрицы, зависящие от координат вершин элемента; начальная деформация элемента:

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha \cdot \Delta T \cdot [1 \ 1 \ 0]^T, \quad (5)$$

где α – коэффициент теплового расширения; ΔT – отклонение температуры от равновесного значения.

После определения перемещений U в узлах рассчитываются деформации в элементе:

$$[\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_{xy}]^T = [B] \cdot [U_{2i-1} \ U_{2i} \ U_{2j-1} \ U_{2j} \ U_{2m-1} \ U_{2m}]^T. \quad (6)$$

Величины напряжений $\{\sigma\}^T = [\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}]$ в элементах вычисляются по закону Гука

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} - [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \quad (7)$$

либо через узловые перемещения:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot [B] \cdot \{U\} - [D] \cdot \{\varepsilon_0\}. \quad (8)$$

Описанная методика численного расчета реализована в виде пакета прикладных программ.

Исследуемая область (рис. 1) разбивалась на 3040 треугольных элементов, число узлов при этом – 1905. Длина дополнительно «высвобожденного» участка стержня в торцевой зоне статора принималась в термомеханических расчетах равной 20 см. Результаты исследований с помощью МКЭ отражены на рис. 2, 3 (соответственно термомеханические перемещения узлов изоляции и напряжения в ее элементах по длине стержня ОС генератора: 1, 3 – аксиальные (по оси x модели) при обычном закреплении и наличии свободного от закрепления участка длиной 20 см в пазовой зоне на торце сердечника; 2, 4 – радиальные (по оси y) при тех же условиях).

По сравнению с вариантом традиционного крепления пазовой части обмотки при наличии «свободного» участка наблюдается некоторое возрастание максимальных аксиальных (соответственно от 1,425 до 1,572 мм, т.е. приблизительно на 10 %) и в большей мере радиальных (практически в 2 раза – от 0,371 до 0,762 мм по абсолютным значениям) перемещений (деформаций) узлов изоляции в



Рис. 1

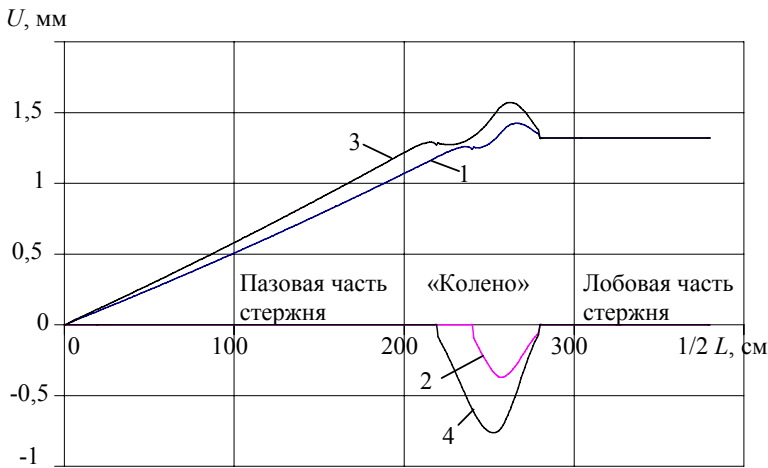


Рис. 2

составляет 5,5 % (-105,5 против -100,1 МПа по кривым 1, 3), радиальных – 8,1 % (-209,1 по сравнению с -193,4 МПа – соответственно «пики» на кривых 2, 4). На этом участке стержня абсолютные величины напряжений узлов изоляции превышают допустимые значения по механической прочности ее материала (80...90 МПа).

Термомеханические нагрузки в «свободной» зоне стержня незначительны при обоих вариантах креплений пазовой части обмотки в торцевой зоне статора, величины и характер их распределения определяются тепловым состоянием, геометрическими размерами и конфигурацией «колена».

В месте начала крепления лобовых частей обмотки бандажными нагрузками в изоляции во втором случае значительно возрастают: аксиальные напряжения в этих узлах модели повышаются от -74 при стандартном закреплении пазовой части стержня до -103,9 МПа («пики» на кривых 1, 3) при высвобождении участка стержня в торцевой зоне сердечника статора (отличия около 40,4 %); радиальные же нагрузки изменяются соответственно от -135,3 до -164,4 МПа, или на 21,5 % (по кривым 2, 4).

Напряжения в закрепленных лобовых частях обмотки определяются граничными условиями I рода (перемещениями) по результатам численного термомеханического расчета половины сердечника (от середины до торцевой зоны со стороны турбины) в аксиальном сечении на основе данных о нагреве различных его областей в номинальном режиме.

Способ закрепления стержней в пазах статора определяет степень влияния ОС на состояние зубцов сердечника в крайнем пакете и неравномерность распределения давлений прессовки, обусловленную конструктивными и технологическими факторами [3].

Результаты численного моделирования при двух вариантах крепления показали лишь незначительное снижение термонапряжений в пазовой части стержня ОС и их локальных максимальных значений в торцевой зоне сердечника; при этом наблюдается эффект смещения («миграции») последних вглубь паза с точки зрения влияния перемещений стержня на



Рис. 3

месте выхода стержня из паза (кривые 3, 4 на участке «колена», рис. 2).

В то же время радиальные и аксиальные термомеханические напряжения (рис. 3) в элементах изоляции пазовой части стержня снижаются по абсолютной величине во всех точках вдоль аксиальной длины обмотки незначительно (порядка на 5 %). При этом на выходе из паза (начало «колена») уменьшение локальных максимальных аксиальных значений напряжений

степень ослабления прессовки крайних пакетов статора с увеличением длины свободного участка обмотки в торце паза (видно на рис. 3 из сравнения характера кривых напряжений в изоляции 1 – 3, 2 – 4 на участках вблизи выхода стержня из паза).

Полученные теоретические выводы подтверждают информацию [3] и объясняют приводимые данные об имевших место на генераторах фактах локального ослабления прессовки и распушения не

самых крайних пакетов статора, а расположенных непосредственно после свободных участков или после склеенных пакетов на некотором расстоянии от торца. Указанные негативные факторы усугубляют процесс деградации сердечника статора генератора в рабочих режимах.

Заключение. 1. Проведенные комплексные исследования термомеханических характеристик изоляции обмотки статора турбогенератора позволили установить закономерности их распределения с учетом различных конструктивных факторов и режимных параметров.

2. При различных вариантах крепления обмотки в пазу максимальные величины радиальных и аксиальных термомеханических напряжений узлов стержня в элементах торцевой зоны сердечника статора превышают допустимые значения по механической прочности материала изоляции.

3. Качественно и количественно определена степень влияния свободного участка стержня в торце паза статора машины на величины перемещений и зону концентрации максимальных напряжений в изоляции обмотки. При наличии свободного участка в пазовой части обмотки:

– максимальные значения радиальных перемещений узлов изоляции в месте выхода стержня из паза возрастают практически в 2 раза;

– радиальные и аксиальные термомеханические напряжения в элементах изоляции пазовой части стержня и на выходе его из паза снижаются незначительно (не более 8 %);

– наблюдается эффект смещения («миграции») локальных термонапряжений вглубь паза, что способствует повышению неравномерности распределения давления прессовки в крайних пакетах сердечника при нагрузочных режимах работы генератора;

– существенно возрастают термомеханические нагрузки в изоляции в области начала крепления лобовых частей обмотки бандажами (до 40 % в аксиальном и 22 % в радиальном направлениях).

1. Аврух В.Ю., Пикульский В.А., Чистиков А.А. Исследование возможностей снижения термомеханических нагрузок в статорах турбогенераторов // Электрические станции. – 1986. – № 4. – С. 42–44.
2. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. – Ленинград: Наука, 1986. – 184 с.
3. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов // Электросила. – 2004. – № 43. – С. 56–64.
4. Голоднова О.С., Фирсанов Е.П. Отклик на статью Пикульского В.А., Рябова Е.В., Цветкова В.А., Чистикова А.А. «Термомеханические исследования статора турбогенератора ТГВ-300» // Электрические станции. – 1986. – № 5. – С. 69–71.
5. Зозулін Ю.В., Антонов О.Є., Бичік В.М. та ін. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. – Харків: ПФ «Колегіум», 2011. – 228 с.
6. Кучинский К.А. Тепловые и термомеханические характеристики элементов статора в динамическом режиме турбогенератора ТГВ-200 при различных условиях вентиляции стержней обмотки // Техн. электродинамика. – 2011. – № 3. – С. 40–45.
7. Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузок. – К.: Наук. думка, 1985. – 208 с.
8. Фирсанов Е.П. Оценка показателей термомеханического состояния статора турбогенератора с учетом пружинящих устройств в узлах крепления // www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/11626.html. – 19.12.2011.–16 с.

УДК 621.313.322

К.А. Кучинський, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Термонапружений стан ізоляції обмотки статора турбогенератора при різних варіантах її кріплення в торцевій зоні осердя

Чисельно досліджено термомеханічні характеристики ізоляції стержня обмотки статора потужного турбогенератора з урахуванням різних конструктивних факторів. Визначено закономірності розподілу термонапружень, встановлено незначне зниження їх значень у пазовій частині та ефект «міграції» максимальних величин у просторі при наявності вільної ділянки обмотки в торцевій зоні осердя. Отримані результати пояснюють факти локального ослаблення пресування та розпушування пакетів статора, розташованих безпосередньо після вільних ділянок або після склеєних пакетів на деякій відстані від торця, що збільшує процес деградації осердя статора генератора в робочих режимах. Бібл. 8, рис. 3.

Ключові слова: турбогенератор, обмотка статора, ізоляція, термомеханічні переміщення та напруження, метод скінченних елементів.

К.А. Kuchynskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The thermostressed state of isolation of the winding of the stator of the turbogenerator at various alternatives of its fastening in the end face of the core

Thermomechanical characteristics of isolation of the rod of a winding of the stator of the powerful turbogenerator taking into account various efficiency factors are numerically investigated. Regularity of distribution of thermostresses are defined, insignificant decrease in their values in a grooving part and effect of «migration» of the maximum magnitudes in space in the presence of a free section of a winding in a end face of the core is established. The gained results explain the facts of local easing of pressing the packages of the stator which has been had directly after free sections or after stuck together packages on some distance from an end face that aggravates process of degradation of the core of the stator of the generator in operating modes. References 8, figures 3.

Key words: the turbogenerator, stator winding, isolation, thermomechanical movings and stresses, finite element method.

Надійшла 25.01.2016

Received 25.01.2016

УДК 621.313.03

КАСКАДНИЙ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

А.І. Антоненко, канд. техн. наук

Київський національний університет технологій та дизайну,
вул. Немировича-Данченка, 2, Київ-11, 01011, Україна
e-mail: antonenko39@gmail.com

Розглянуто можливість створення безредукторного автономного генератора змінного струму промислової частоти для вітроенергетичної установки з малою (близько 300 об/хв) частотою обертання та отримання співвідношень між його параметрами. Бібл. 4, рисунок.

Ключові слова: електрична машина, фазний ротор, каскадне з'єднання, обмотка.

Враховуючи, що на сьогодні запаси енергоресурсів обмежені, все більшого значення набуває використання відновлюваних екологічно чистих джерел енергії, до яких належать вітро- та гідроенергетика. Деякі країни особливо інтенсивно розвивають вітроенергетику, зокрема, на 2011 рік у Данії за допомогою вітрових енергоустановок (ВЕУ) виробляється 28 % всієї електроенергії країни, Китай наростив встановлені потужності вітрових електростанцій за 2005–2011 рр. з 1260 до 62733 МВт [2].

Для вітро- та гідросилових установок характерні низькі частоти обертання. Вітрові енергоустановки можна поділити на дві категорії: промислові та побутові (для приватного використання). Побутові ВЕУ мають набагато меншу потужність, ніж промислові, й часто виконуються зі збудженням постійними магнітами. При цьому напруга генератора і за величиною, і за частотою залежить від частоти обертання і потребує перетворювача частоти на повну потужність, що знижує коефіцієнт корисної дії ВЕУ. Метою роботи є дослідження можливості виконання генератора змінного струму зі стабільною частотою при регулюванні його електромагнітного збудження за величиною і частотою при зміні частоти обертання.

Об'єкти та методи дослідження. Щоб отримати напругу промислової частоти, генератор повинен мати при низькій частоті обертання велике число пар полюсів. Це викликає певні труднощі забезпечення ефективного використання об'єму, відведеного для генератора. Цих труднощів можна уникнути завдяки використанню каскадного з'єднання електричних машин з фазним ротором [1]. Для аналізу електромагнітних процесів в усталеному режимі роботи скористаємось методом кругових обертальних полів та класичними методами зведення параметрів обмоток до однієї частоти, числа фаз та числа витків у схемі заміщення фази.